

УДК 621.311:51-7

DOI 10.52167/1609-1817-2025-138-3-500-510

А. Аманбаев¹, Б. Онгар¹, Ж.С.Дүйсенбек², О.М. Талипов³ Е.А.Сарсенбаев¹

¹Satpayev University, Алматы, Казахстан

²Energo University, Алматы, Казахстан

³Toraighyrov University, Павлодар, Казахстан

E-mail: aitumar.amanbayev@gmail.com

КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЗОР НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ДИСТИЛЛЯТОРОВ И ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С НАУЧНОМЕТРИЧЕСКИМ АНАЛИЗОМ

Аннотация. В последние годы системы солнечных дистилляторов привлекли большое внимание и были тщательно исследованы, особенно в контексте повышения их энергоэффективности и потенциала для производства электроэнергии. В настоящее время считается, что использование наномодифицированных материалов с фазовыми переходами (НММФП) в качестве термонакопительных сред для солнечных дистилляторов является эффективным способом повышения их производительности, включая возможность интеграции с энергогенерирующими системами. Цель данной работы — представить всесторонний обзор последних разработок в системах ММФП для солнечных дистилляторов, улучшенных с помощью наночастиц, с акцентом на их применение в энергетике. Системы солнечных дистилляторов используют различные методы усиления теплообмена, такие как ребра, пористые носители, микроинкапсулированные ММФП, НММФП и модификации конфигурации системы для улучшения теплопроводности, что также может способствовать повышению производительности электроэнергии. В связи с этим проведено тщательное исследование, охватывающее влияние некоторых важных наночастиц, улучшивших ММФП, таких как Ag, CuO, Al₂O₃, ZnO, графен, углеродные нанотрубки, на системы дистилляции солнечных дистилляторов, а также на возможности их интеграции в системы производства энергии. Также представлен обзор использования НММФП в различных конфигурациях солнечных дистилляторов, включая традиционные, пирамидальные, трубчатые и лотковые солнечные дистилляторы, с учетом их потенциальной роли в генерации электроэнергии. В работе также рассматриваются все попытки устранить ограничения, такие как низкая теплопроводность ММФП, водопроизводительность и тепловая эффективность солнечных дистилляторов, а также экономические и экологические трудности. Кроме того, проводится научный анализ литературы в области использования ММФП в дистилляции солнечных дистилляторов для анализа основных журналов, авторов, источников финансирования, стран и ключевых слов в этой области исследований.

Ключевые слова: солнечные дистилляторы, солнечная десалинация, наномодифицированные материалы с фазовыми переходами (НММФП), наночастицы.

Введение.

Из-за растущего осознания проблемы глобального потепления, вызванного традиционными методами получения энергии, а также технологических и экономических достижений в области солнечных технологий, все больше исследований сосредоточено на солнечных системах [1]. Солнечная энергия является самым широко

используемым источником возобновляемой энергии для производства электроэнергии [2], солнечных обогревателей, опреснения соленой воды, солнечных сушилок, солнечной кулинарии, печатных цепей, солнечной биомассы, отопления металлов, солнечных труб и солнечных термальных материалов [3]. В контексте улучшения энергоэффективности, солнечная энергия также предоставляет потенциал для производства электроэнергии, что делает ее важным компонентом в системах возобновляемой энергетики.

Для улучшения производства солнечных дистилляторов было предложено много модификаций, которые рассмотрены в работах. Поскольку солнечная энергия является переменным ресурсом, солнечные дистилляторы должны накапливать солнечную энергию, чтобы быть надежными компонентами энергетических систем. Материалы с фазовыми переходами (ММФП) привлекли большое внимание с точки зрения тепловой энергии, поскольку они не только обеспечивают высокую емкость для хранения по сравнению с традиционными методами теплового накопления в очень широком диапазоне температур, но и решают проблему ограничений термохимических методов хранения с приемлемым состоянием практики. Установка ММФП в солнечные дистилляторы является улучшенным вариантом для повышения их эффективности, так как этот процесс не использует химических веществ и экологически безопасен. Кроме того, ММФП может продлить рабочие часы солнечных дистилляторов до поздней ночи, увеличивая ежедневное производство и улучшая их энергетическую эффективность. Многие исследовательские проекты направлены на улучшение тепловых свойств материалов с фазовыми переходами в солнечных дистилляторах с использованием различных технологий, таких как использование наночастиц. Эти вещества, часто называемые НММФП, облегчают зарядку и разрядку накопителей тепла благодаря повышенной теплопроводности и пониженной температуре плавления [4].

Один из практических методов использования солнечной энергии для производства пресной воды - это система солнечного опреснения. Температура абсорбирующей поверхности в солнечных дистилляторах повышается за счет солнечного излучения, и естественная конвекция между солнечной водой и абсорбирующей пластиной также повышает температуру воды. Повышение температуры воды увеличивает скорость ее испарения. Парообразованная вода затем конденсируется в капли и выходит из системы солнечного опреснения через внутреннюю стенку стеклянной крышки. В качестве материала для хранения энергии ММФП позволяет диспергировать различные наночастицы, увеличивая количество воды, которое производит солнечное опреснение. Это можно достичь, храня в ММФП энергию, полученную в пиковые часы, а также тепло, теряемое с боковых стенок и дна резервуара, которое затем может быть использовано снова для производства в вечернее время и ночью. Когда необходимы извлечение и хранение тепла, ММФП используются в различных термических приложениях. Материалы с фазовыми переходами могут накапливать тепло и выделять его по мере необходимости. Несколько исследователей установили, что использование наночастиц может повысить теплопроводность (ТП), даже если ММФП используется в качестве материала для накопления тепла (НТЭ) из-за его ограниченных тепловых характеристик. Темп накопления и выделения тепла от НММФП значительно зависит от добавления наночастиц.

Материалы и методы.

Коррозия является значительной проблемой в различных отраслях, так как она может привести к структурным повреждениям, снижению производительности и угрозам безопасности. При выборе материалов для конкретного применения важно

учитывать их устойчивость к коррозии. Предпочтение отдается материалам с низким уровнем коррозионной активности, поскольку они, как правило, имеют лучшую долговечность и более продолжительный срок службы. При выборе материалов следует учитывать различные факторы, такие как окружающая среда, температура, химическое воздействие и механические нагрузки. Также в указанном контексте существует долгосрочная возможность деградации металлических контейнеров из-за различных химических или электрохимических реакций, происходящих между поверхностью контейнера и ММФП или НММФП при их хранении. Когда ММФП контактируют с металлами или сплавами, они могут вызывать коррозию из-за их химического взаимодействия с поверхностью контейнера.



Рисунок 1 - Подготовка парафиновым воском с использованием серебряных наночастиц [7]

Подготовка материала с фазовым переходом (ММФП) с наночастицами обычно включает следующие практические этапы. Сначала измеряются пеллеты ММФП. Затем используется нагреватель для плавления измеренных пеллет ММФП, а перемешиватель применяется для смешивания измеренного веса наночастиц с ММФП для достижения однородности. Рисунок 1 графически иллюстрирует процесс подготовки парафиновым воском с использованием серебряных наночастиц, как это описано в работе Сатъямути [5]. Сначала пеллеты парафинового воска измеряются и хранятся в стакане. После этого используется горячий нагреватель для плавления измеренных пеллет воска. Затем магнитный мешалка используется для того, чтобы в течение 1 часа смешать измеренный вес наночастиц серебра (Ag NPs) с воском для достижения однородности. После смешивания используется зонд-соникатор для ультразвуковой обработки воска,

содержащего наночастицы, в течение 1 часа. Наночастицы Ag NPs комбинируются в двух различных концентрациях: 1% мас. и 2% мас. с парафиновым воском. Ансу и др. [6] сообщили, что полиэтиленгликоль (ПЭГ) был помещен в стакан и расплавлен с использованием нагретой плиты, поддерживающей температуру выше точки плавления. В то же время выполнялось перемешивание для обеспечения равномерного плавления материала. После полного расплавления ПЭГ в жидкую субстанцию было добавлено 1%, 2%, 3%, 4% и 5% массовой доли порошка Al₂O₃. Для равномерного распределения наночастиц в ПЭГ использовалась двухступенчатая процедура перемешивания и ультразвуковой обработки. Для ультразвуковой обработки смеси использовался зонд-соникатор, который обрабатывал смесь в течение 30 минут при частоте 20 Гц.

Научнометрическое исследование, проведенное в данной работе, началось с сбора библиографических данных из базы данных Scopus с использованием двух ключевых слов. Изначально было выбрано ключевое слово "солнечный дистиллятор", что дало 3645 записей, затем добавление термина "Материалы с фазовыми переходами" сократило количество до 305. Временной интервал поиска — с 2000 по 2023 год, все типы документов и все источники были выбраны с целью получения всех доступных материалов через поисковую систему Scopus. Было проверено, что до 2000 года не было найдено статей. Также были исключены нерелевантные документы, такие как статьи по стоматологии и медицине. Данные были сохранены в формате CSV для дальнейшей обработки с использованием программы VOSViewer (версия 1.6.20). Кроме того, был использован инструмент "анализ результатов" в Scopus для получения статистических данных о собранных материалах, таких как количество документов по годам, прогресс в количестве документов по основным источникам, количество документов по авторам, по аффилиациям, по странам, типам документов и темам. Результаты показали, что около 67% составляют научные статьи, 17% — статьи с конференций и 15% — обзорные статьи. Были разработаны и проанализированы несколько карт сети, таких как картирование библиографической связи авторов, стран и со-упоминания ключевых слов.

Результаты и обсуждение.

Энергетически эффективный солнечный дистиллятор извлекает как можно больше энергии от солнца. Для того чтобы водяной пар конденсировался полностью и быстро, важно, чтобы стеклянная крышка конденсатора теряла тепло. Тем не менее, энергоэффективность можно повысить, а потерю тепла с боковых стенок и дна солнечного дистиллятора можно минимизировать в максимальной степени. Это можно достичь, храня в материалах с фазовыми переходами (ММФП) энергию, доступную в пиковые часы, а также тепло, теряющееся с боковых стенок и основания, которое затем можно использовать снова для дистилляции в вечернее и ночное время. В эти периоды материалы с фазовыми переходами служат источником тепла для воды в резервуаре [8]. Теплопроводность материала оказывает прямое влияние на скорость фазовых изменений в ММФП. Следовательно, лучший способ улучшить КПД ММФП и повысить производительность солнечного дистиллятора — это сочетание их с наночастицами. В целом, ранее проведенные исследования показали, что температуры воды, скорость испарения и образование накопленной пресной воды увеличиваются при использовании НММФП с парафиновым воском (PW) в качестве системы хранения тепловой энергии в солнечном дистилляторе. Благодаря своей доступности, дешевизне и простоте использования парафиновый воск считается наиболее известным и часто используемым типом ММФП в большинстве приложений для накопления энергии, особенно в области опреснения воды с использованием солнечных дистилляторов.

Однако его известным недостатком является низкая ТП. Поэтому для повышения проводимости используется сочетание с различными типами наночастиц.

После подготовки ММФП с наночастицами расплавленный ММФП с наночастицами добавляется в блок накопления тепловой энергии через отверстие, которое закрывается после завершения процесса добавления. Блок накопления тепловой энергии нагревается и поддерживается в горячем состоянии во время процесса добавления ММФП с наночастицами, чтобы избежать образования полостей внутри ММФП. Температура ММФП с наночастицами измеряется с использованием двух термопар. Обе термопары устанавливаются внутри блока, затем берется среднее значение двух показаний.

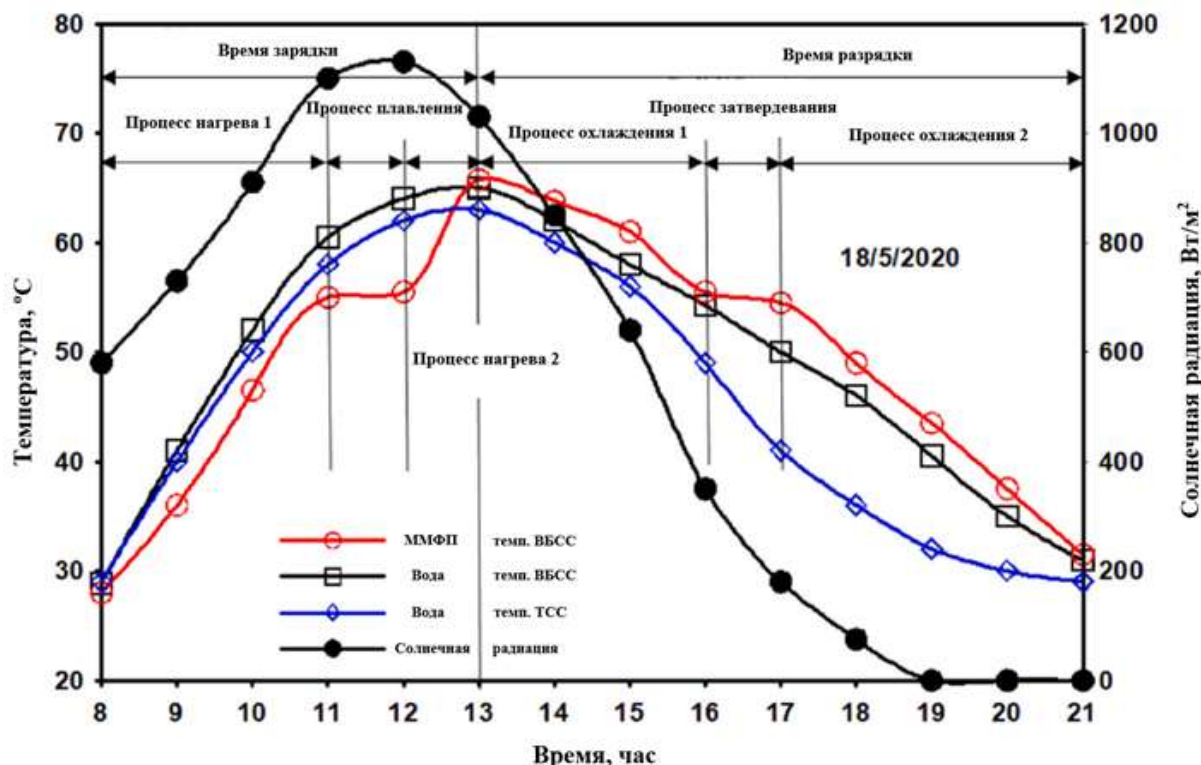


Рисунок 2 - Изменение температуры для ММФП с наночастицами и воды в модифицированном солнечном дистилляторе и традиционном солнечном дистилляторе

На основе рисунка 2 можно сделать вывод, что температура воды и ММФП с наночастицами увеличивается с начала процесса до достижения максимального значения примерно в 13:00, после чего начинает снижаться с уменьшением интенсивности солнечного излучения. В начале нагрева ММФП поглощают энергию от абсорбера солнечной панели и накапливают её как чувствительное тепло. Процесс зарядки ММФП начинается рано утром, когда его температура значительно повышается. Как видно из рисунка 2, температура ММФП steadily увеличивается с 8:00 до 11:00 (процесс 1 нагрева), достигая своей точки плавления около 11:00 и оставаясь там до примерно 12:00 (процесс плавления). С 12:00 до 13:00 температура воды и материала с фазовым переходом начинает снова повышаться из-за увеличения солнечной радиации и температуры воздуха (процесс 2 нагрева). После 13:00 солнечная энергия начинает убывать, и тепло в материалах с фазовыми переходами начинает высвобождаться (процесс охлаждения 1), что приводит к снижению температуры материала с фазовым переходом. Кроме того, около 16:00–17:00 температура материала с фазовым переходом достигает точки его затвердевания. Тепло, передаваемое от

ММФП к воде, вызывает снижение температуры ММФП; это снижение температуры происходит постепенно, пока не достигает температуры воздуха (процесс 2 охлаждения). Средняя температура воды в резервуарах ТСС и модифицированных солнечных дистилляторов показана на рис. 2. Кроме того, на рисунке показано, что средние температуры воды в резервуарах традиционного солнечного дистиллятора (ТСС) и модифицированного солнечного дистиллятора находятся близко друг к другу в фазе нагрева и значительно отличаются в фазе разряда из-за теплопередачи от ММФП к воде в модифицированном резервуаре. Было обнаружено, что после нагрева с использованием материала с фазовым переходом температура воды в резервуаре модифицированного солнечного дистиллятора на 0–2 °С выше, чем в резервуаре традиционного солнечного дистиллятора. Без использования ММФП разница составляет 0–4,5 °С.

Для оценки влияния наножидкостей ZnO на активацию солнечного света и повышение производительности солнечного дистиллятора нужно учитывать несколько аспектов:

Наночастицы оксида цинка (ZnO) обладают уникальными оптическими свойствами, такими как высокая способность к поглощению и рассеянию света. Включение ZnO в наножидкости может увеличить количество поглощённого солнечного света, что повышает эффективность преобразования солнечной энергии в теплоту. Это может быть особенно полезно в солнечных дистилляторах, где требуется высокое поглощение тепла для испарения воды.

Наножидкости ZnO могут улучшать теплопередачу за счёт высокой теплопроводности наночастиц. Это приводит к более эффективному нагреву воды в солнечном дистилляторе и ускоряет процесс испарения воды. Чем быстрее происходит испарение, тем больше воды можно получить за определённый промежуток времени.

Солнечные дистилляторы используют солнечную радиацию для испарения воды. Введение наночастиц ZnO в жидкость может значительно повысить коэффициент поглощения света за счёт увеличения рассеяния и поглощения солнечного излучения. Это может привести к более интенсивному нагреву рабочей жидкости, улучшая таким образом процесс дистилляции.

Ряд исследований показал, что использование наножидкостей ZnO в солнечных дистилляторах может улучшить их производительность. Например, в некоторых экспериментах наблюдали рост производительности на 20-30% по сравнению с традиционными дистилляторами, использующими обычную воду.

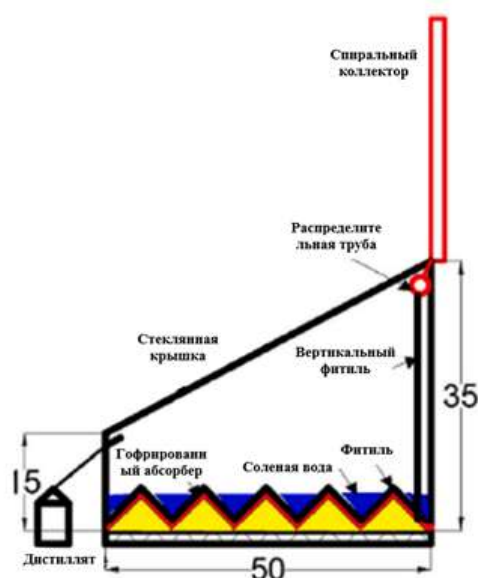
Использование наножидкостей ZnO может также оказать положительное воздействие с точки зрения устойчивости и экологии, поскольку повышенная эффективность системы может привести к меньшему потреблению ресурсов. Кроме того, использование наноматериалов в солнечных дистилляторах способствует экономии энергии и снижению затрат на производство чистой воды.

Использование водонагревателей (спиральная медь) и материалов с фазовыми переходами в сочетании с Ag-наночастицами Абдулла и др. [9] провели экспериментальное исследование для повышения производительности солнечного дистиллятора с волнистым фитилем (ВБСС), как показано на рис. 3. Для подогрева подаваемой воды перед тем, как она достигнет абсорбера солнечного дистиллятора с волнистым фитилем, в конструкцию абсорбера ВБСС был добавлен вертикально расположенный медный спиральный водонагреватель. Для предотвращения попадания солнечного излучения на стены, также были установлены вертикальные фитили. Это снижает температуру боковых стенок и минимизирует количество тепла, которое уходит в окружающую среду. Вдобавок, они также исследовали влияние размещения наночастиц серебра (Ag) и слоя материала с фазовыми переходами под абсорбером

ВБСС. Результаты показали, что ВБСС с медными водонагревателями и НММФП-Ag (8900 мл/м².сутки) имеет тепловую эффективность около 63% и производит на 202% больше воды, чем традиционный солнечный дистиллятор (2950 мл/м².сутки). Они показали, что производительность ВБСС с медными водонагревателями увеличилась почти на 31% при использовании НММФП по сравнению с вариантом без НММФП (171% больше производительности, чем ТСС). Более того, производительность ВБСС с медными водонагревателями увеличилась на почти 24% при использовании ММФП без наночастиц по сравнению с вариантом без ММФП. Таким образом, добавление наночастиц увеличивает характеристики ММФП и приводит к увеличению производительности на 7%.



а)



б)

- а) Фото солнечного дистиллятора с волнистым фитилем и спиральным коллектором.
б) Схема солнечного дистиллятора с волнистым фитилем и спиральным коллектором.

Рисунок 3 - Солнечный дистиллятор с волнистым фитилем и спиральным водяным нагревателем [9]

Заклучение.

В этой статье обсуждены многочисленные исследования по использованию НММФП в различных солнечных дистилляторах. Наночастицы способствуют улучшению тепловых свойств ММФП и снижению температур плавления и затвердевания. Обычно присутствие наночастиц в ММФП улучшает производительность солнечных дистилляторов во всех исследованиях, однако темпы роста производительности различаются в зависимости от типа используемых наночастиц и условий в каждом случае. Исследования показывают, что хотя невозможно однозначно выделить один тип наночастиц как лучший, графит и серебро, за ними следует оксид меди, являются наиболее эффективными для улучшения свойств воска, и оптимальная концентрация составляет 0,3–3% масс. Производительность начинает снижаться при концентрациях выше 3%. Это снижение объясняется агрегацией наночастиц внутри ММФП, что снижает количество произведенной дистилляции и препятствует эффективному переносу тепла. Кроме того, теплопроводность повышается на 30–71% при применении солнечных дистилляторов.

Также парафиновый воск с наночастицами при концентрации 2,5% снижает температуру плавления в среднем на 0,5–1,5 °С. Производительность увеличивается на 10,38–86%, когда ММФП без наночастиц используется в солнечных дистилляторах. Вдобавок производительность увеличивается на 3–35% в результате улучшения свойств ММФП благодаря добавлению наночастиц. Обычно для материала резервуара солнечного дистиллятора используются медь, алюминий и нержавеющая сталь, так как они обладают хорошими тепловыми свойствами и устойчивостью к коррозии.

Необходимы дальнейшие исследования, чтобы одновременно изучить различные типы солнечных дистилляторов с НММФП и выяснить, как они отличаются по функциональности. Учитывая, что разные регионы испытывают климатические колебания в течение года, необходимо создать эмпирическую модель, прогнозирующую эффективность солнечного дистиллятора в зависимости от атмосферных условий. Кроме того, использование НММФП с улучшенными наночастицами для охлаждения внешнего конденсатора и стеклянной крышки солнечного дистиллятора также требует дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, M.M. Younes, Техники, используемые для улучшения производительности ступенчатых солнечных дистилляторов – обзор. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46, 2015. -178–188 с.

[2] Altwallbah Neda Mahmud Mohammad, Mohd Amran Mohd Radzi, Norhafiz Azis, Suhaidi Shafie, Muhammad Ammirul Atiqi Mohd Zainuri, Новый гибридный подход для максимизации извлеченной тепловой энергии в условиях частичного затенения, *Sustainability* 12 (14), 2020. -5786 с.

[3] Felody Kapole, Steven Mudenda, Prem Jain, Исследование основных инициатив мини-гридов солнечной энергии в Замбии, *Results in Engineering* 18, 2023. -101095 с.

[4] F. Sarhaddi, F.F. Tabrizi, H.A. Zoori, S.A.H.S. Mousavi, Сравнительное исследование двух каскадных типов солнечных дистилляторов с и без накопления тепла с использованием энергии и эксергии, *Energy Convers. Manag.* 133, 2017. - 97–109с.

[5] Ravishankar Sathyamurthy, Серебряные (Ag) наночастицы в парафиновом воске как тепловой энергоаккумулятор для ступенчатых солнечных дистилляторов — экспериментальный подход, *Sol. Energy* 262. 2023. -111808 с.

[6] Alok Kumar Ansu, R.K. Sharma, F.Y. Nagos, D. Tripathi, V.V. Tyagi, Улучшенные тепловые свойства и накопление энергии на основе полиэтиленгликоля, содержащего алюминированный оксид, для солнечных тепловых приложений, *J. Therm. Anal. Calorim.* 143, 2021.1881–1892 с.

[7] K. Karthikeyan, V. Mariappan, P. Kalidoss, R. Anish, P. Sarafoji, Janke Reddy, Taras Kumar Satpathy, Подготовка и термическая характеристика бинарной эвтектической смеси капрической-мираистической кислоты с серебряно-антимоновой оксидной и серебряно-графеновой нанопластинкой для применения в строительных материалах, *Mater. Lett.* 328, 2022.-133086 с.

[8] P. Katekar Vikrant, Sandip S. Deshmukh, Обзор использования материалов с фазовыми переходами в производительности солнечных дистилляторов, *J. Energy Storage* 30, 2020. -101398 с.

[9] Ana Lázaro, M. Bobi Belén Zalba, Cecilia Castellon, Luisa F. Cabeza, Экспериментальное исследование совместимости материалов с фазовыми переходами и пластиков, *AIChE J.* 52 (2), 2006. 804–808 с.

REFERENCES

- [1] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, M.M. Younes, Tehniki, ispol'zuemye dlja uluchsheniya proizvoditel'nosti stupenchatyh solnechnyh distilljatorov – obzor. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46, 2015. -178–188 s.
- [2] Altwallbah Neda Mahmud Mohammad, Mohd Amran Mohd Radzi, Norhafiz Azis, Suhaidi Shafie, Muhammad Ammirul Atiqi Mohd Zainuri, Novyj gibridnyj podhod dlja maksimizacii izvlechennoj teplovoj jenerгии v uslovijah chastichnogo zatneneniya, *Sustainability* 12 (14), 2020. -5786 s.
- [3] Felody Kapole, Steven Mudenda, Prem Jain, Issledovanie osnovnyh iniciativ mini-gridov solnechnoj jenerгии v Zambii, *Results in Engineering* 18, 2023. -101095 s.
- [4] F. Sarhaddi, F.F. Tabrizi, H.A. Zoori, S.A.H.S. Mousavi, Sravnitel'noe issledovanie dvuh kaskadnyh tipov solnechnyh distilljatorov s i bez nakopleniya tepla s ispol'zovaniem jenerгии i jekserгии, *Energy Convers. Manag.* 133, 2017. - 97–109s.
- [5] Ravishankar Sathyamurthy, Serebrjanye (Ag) nanochasticy v parafinovom voske kak teplovoj jenergoakkumuljator dlja stupenchatyh solnechnyh distilljatorov — jeksperimental'nyj podhod, *Sol. Energy* 262. 2023. -111808 s.
- [6] Alok Kumar Ansu, R.K. Sharma, F.Y. Hagos, D. Tripathi, V.V. Tyagi, Uluchshennye teplovyje svojstva i nakoplenie jenerгии na osnove polijetilenglikolja, sodержashhego aljuminievyy oksid, dlja solnechnyh teplovyh prilozhenij, *J. Therm. Anal. Calorim.* 143, 2021.1881–1892 s.
- [7] K. Karthikeyan, V. Mariappan, P. Kalidoss, R. Anish, P. Sarafoji, Janke Reddy, Tapas Kumar Satpathy, Podgotovka i termicheskaja harakteristika binarnoj jeutekticheskoy smesi kapricheskoy-miraisticheskoy kisloty s serebrjano-antimonovoj oksidnoj i serebrjano-grafenovoj nanoplastinkoj dlja primeneniya v stroitel'nyh materialah, *Mater. Lett.* 328, 2022.-133086 s.
- [8] P. Katekar Vikrant, Sandip S. Deshmukh, Obzor ispol'zovaniya materialov s fazovymi perehodami v proizvoditel'nosti solnechnyh distilljatorov, *J. Energy Storage* 30, 2020. -101398 s.
- [9] Ana Lázaro, M. Bobi Belén Zalba, Cecilia Castellon, Luisa F. Cabeza, Jeksperimental'noe issledovanie sovместimosti materialov s fazovymi perehodami i plastikov, *AIChE J.* 52 (2), 2006. 804–808 s.

Айтұмар Аманбаев, магистр, аға оқытушы, Satpayev University, Алматы, Қазақстан, aitumar.amanbayev@gmail.com

Булбул Онгар, PhD, қауымдастырылған профессор, Satpayev University, Алматы, Қазақстан, ongar_bulbul@mail.ru

Жансая Дуйсенбек, PhD, Energo University, Алматы, Қазақстан, zhaniko.adina@mail.ru

Олжас Талипов, PhD, қауымдастырылған профессор, Toraighyrov University, Павлодар, Қазақстан, talipov1980@mail.ru

Ерлан Сарсенбаев, PhD, қауымдастырылған профессор, Satpayev University, Алматы, Қазақстан, y.sarsenbayev@satbayev.university

КҮН ДИСТИЛЛЯТОРЛАРЫНА АРНАЛҒАН НАНОМОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ФАЗАЛЫҚ АУЫСПАЛЫ МАТЕРИАЛДАРҒА ЖӘНЕ ҒЫЛЫМИ ТАЛДАУМЕН ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУГЕ КЕШЕНДІ ШОЛУ

Аңдатпа. Соңғы жылдары күн энергиясын пайдалану жүйелері көп назар аударылып, әсіресе олардың энергия тиімділігін арттыру және электр энергиясын өндіру әлеуетін жақсарту тұрғысынан кеңінен зерттелді. Қазіргі уақытта күн энергиясын жинайтын құрылғыларда термиялық сақтау материалдары ретінде наномодификацияланған фазалық өзгерістер материалдарын (НМФӨМ) қолдану олардың жұмысын жақсартудың тиімді тәсілі болып табылатыны қабылданған, сонымен қатар бұл жүйелерді энергия өндіретін жүйелермен интеграциялау мүмкіндігі бар. Осы жұмыстың мақсаты - нанобөлшектермен жетілдірілген күн энергиясын жинайтын құрылғылар үшін фазалық өзгеріс материалдарының (ФӨМ) жүйелеріндегі соңғы жетістіктерді жан-жақты шолу жасау, олардың энергетика саласындағы қолданылуына назар аудара отырып. Күн энергиясын жинайтын құрылғылар жылу алмасуды жақсарту үшін түрлі әдістерді пайдаланады, мысалы, қанатшалар, кеуекті тасымалдаушылар, микроинкапсулирленген ФӨМ, НМФӨМ және жылу өткізгіштікті жақсартатын жүйелік конфигурацияны өзгерту, бұл энергия өнімділігін арттыруға да ықпал етуі мүмкін. Осыған орай, күн энергиясын жинайтын құрылғылардың дистилляция жүйелеріне әсер ететін маңызды наночастицалар, мысалы, Ag, CuO, Al₂O₃, GO, графен және көміртекті нанотрубкалар туралы толық зерттеу жүргізілді, және оларды энергия өндіру жүйелеріне интеграциялау мүмкіндігі қарастырылды. Сонымен қатар, күн энергиясын жинайтын құрылғылардың түрлі конфигурацияларында НМФӨМ қолдану, оның ішінде дәстүрлі, пирамида тәрізді, түтікшелі және лотокты күн энергиясын жинайтын құрылғылардың мүмкін рөлі электр энергиясын өндіруде қарастырылған. Жұмыста ФӨМ-нің төмен жылу өткізгіштігі, су өндіру және күн энергиясын жинайтын құрылғылардың жылу тиімділігі сияқты шектеулерді жоюға бағытталған барлық әрекеттер, сондай-ақ экономикалық және экологиялық қиындықтар талқыланған. Бұдан басқа, күн энергиясын жинайтын құрылғылардағы дистилляцияда ФӨМ қолдану туралы әдебиеттің ғылымиметрикалық талдауы жүргізілген, бұл зерттеу саласындағы негізгі журналдар, авторлар, қаржыландыру көздері, елдер мен кілт сөздер талданды.

Түйінді сөздер: күн энергиясын жинайтын құрылғылар, күннен алынатын тұзсыздандыру, наномодификацияланған фазалық өзгеріс материалдары (НМФӨМ), нанобөлшектер.

Aitumar Amanbaev, master, senior lecturer, Satpayev University, Almaty, Kazakhstan, aitumar.amanbayev@gmail.com

Bulbul Ongar, PhD, associate professor, Satpayev University, Almaty, Kazakhstan, ongar_bulbul@mail.ru

Zhansaya Duissenbek, PhD, Energo University, Almaty, Kazakhstan, zhaniko.adina@mail.ru

Olzhas Talipov, PhD, associate professor, Toraihyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, talipov1980@mail.ru

Yerlan Sarsenbaev, PhD, associate professor, Satpayev University, Almaty, Kazakhstan, y.sarsenbayev@satbayev.university

COMPREHENSIVE REVIEW OF NANOMODIFIED MATERIALS WITH PHASE TRANSITIONS FOR SOLAR DISTILLERS AND POWER GENERATION WITH SCIENTIFIC ANALYSIS

Abstract. In recent years, solar still systems have gained significant attention and have been thoroughly researched, especially in the context of improving their energy efficiency and potential for electricity generation. It is currently believed that the use of nano-enhanced phase change materials (NE-PCMs) as thermal storage media for solar stills is an effective way to enhance their performance, including the possibility of integration with energy-generating systems. The aim of this work is to provide a comprehensive review of the latest developments in PCM systems for solar stills, enhanced with nanoparticles, with a focus on their application in the energy sector. Solar still systems employ various methods to enhance heat exchange, such as fins, porous carriers, microencapsulated PCMs, NE-PCMs, and system configuration modifications to improve thermal conductivity, which may also contribute to increasing energy productivity. In this regard, a thorough study has been conducted, covering the impact of some important nanoparticles, such as Ag, CuO, Al₂O₃, GO, graphene, and carbon nanotubes, on the distillation systems of solar stills, as well as their potential integration into energy production systems. Additionally, a review of the use of NE-PCMs in various solar still configurations, including conventional, pyramid, tubular, and tray solar stills, is provided, considering their potential role in electricity generation. The work also discusses all attempts to overcome limitations such as low thermal conductivity of PCMs, water productivity, and thermal efficiency of solar stills, as well as economic and environmental challenges. Furthermore, a scientometric analysis of the literature on the use of PCMs in solar still distillation is carried out to analyze the main journals, authors, funding sources, countries, and keywords in this research area.

Keywords: solar stills, solar desalination, nano-enhanced phase change materials (NE-PCMs), nanoparticles.

Поступила: 02 февраля 2025 года

Рецензирована: 11 марта 2025 года

Принята: 03 июня 2025 года